

引用格式: 丁猛, 宋小龙, 白建峰, 等. 强制分类背景下社区生活垃圾源头分类与综合处理系统减碳效率[J]. 资源科学, 2023, 45(1): 18-30. [Ding M, Song X L, Bai J F, et al. Carbon reduction efficiency of community domestic waste separation at source and comprehensive treatment system under compulsory classification[J]. Resources Science, 2023, 45(1): 18-30.] DOI: 10.18402/resci.2023.01.02

强制分类背景下社区生活垃圾源头分类与综合处理系统减碳效率

丁 猛¹, 宋小龙^{1,2}, 白建峰^{1,2}, 庄绪宁^{1,2}, 赵 静^{1,2}, 李维明³, 罗 伟⁴

(1. 上海第二工业大学资源与环境工程学院, 上海 201209; 2. 上海电子废弃物资源化协同创新中心, 上海 201209; 3. 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所, 北京 100010; 4. 北京京环智慧环保科技有限公司, 北京 100101)

摘 要:【目的】在强制分类背景下, 不同分类收集方式会改变生活垃圾物质流向与后续收运处置过程, 进而影响回收处理系统的生命周期碳排放和经济表现。本文针对北京社区垃圾源头分类与综合处理系统的不同情景, 开展减碳效率分析与优化, 为建立因地制宜的垃圾分类收集模式提供科学依据。【方法】采用物质流分析方法(MFA)对回收处理全过程的物质流向和流量进行分析, 结合生命周期碳排放量核算(LCCA)和生命周期成本分析(LCC)分别评估碳足迹和经济成本, 在此基础上提出减碳效率指标并进行优化分析。【结果】基准情景(S1)和优化情景(S2-S5)的生命周期碳排放量分别为-148.14 kgCO₂e、-236.44 kgCO₂e、-251.25 kgCO₂e、-297.06 kgCO₂e、-343.51 kgCO₂e。相对于S1, 4种优化情景均表现为正向的减碳效率, 减碳效率值依次为S5(2.20)>S4(1.66)>S3(1.38)>S2(1.31)。S5对应的“垃圾分类驿站+可回收物智能回收箱+垃圾分类指导员”优化模式具有最高的减碳效率。在垃圾综合处理能力和各组分处理能力充足的前提下, 随着准确分类比例增加, 减碳效率也逐步提升。【结论】源头分类收集体系的建立和完善, 增加了前端基础设施运行成本、人力成本 and 环境影响, 但有效提高了后端分类处理效率及再生资源产出率, 带来生命周期碳减排效益的提高。随着今后居民垃圾分类自主投放参与率和准确率上升, 收集阶段经济成本将大幅降低, 减碳效率可进一步提升。

关键词: 城市生活垃圾; 垃圾分类; 物质流分析; 生命周期评价; 生命周期成本; 减碳效率; 北京

DOI: 10.18402/resci.2023.01.02

1 引言

随着碳达峰碳中和目标的提出, 中国生态文明建设进入了以降碳为重点战略方向、推动减污降碳协同增效的关键时期^[1-3]。作为温室气体排放的主要来源之一, 废物管理活动近年来受到了政府和众多研究人员的关注。随着城市化的发展和人民生活水平的提高, 中国城市生活垃圾数量迅速增加, 由此带来的环境问题亟待解决。2020年中国生活

垃圾清运量达到23512万t^[4]。生活垃圾在收集运输和处置过程中都会排放大量温室气体, 对气候和环境产生很大影响。减少城市生活垃圾处理产生的温室气体排放是实现中国国家减排目标的有效途径之一。

城市生活垃圾管理活动的温室气体排放源自收集、运输和末端处置等多个阶段。国外有不少研究者采用物质流分析(MFA)、生命周期评价(LCA)

收稿日期: 2022-10-13; 修订日期: 2023-01-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1906101); 上海市浦东新区科技发展基金民生科研专项(PKJ2022-C09)。

作者简介: 丁猛, 男, 江苏南通人, 硕士生, 研究方向为生命周期评价及其应用。E-mail: dingmeng0820@163.com

通讯作者: 宋小龙, 男, 安徽安庆人, 博士, 研究员, 研究方向为资源循环与废物管理、生命周期评价、碳足迹与碳减排潜力分析。E-mail: songxiaolong@sspu.edu.cn

2023年1月

等方法对生活垃圾末端处理阶段的温室气体排放进行了研究,发现通过各类垃圾综合处理^[5-7]、材料回收和能源回收^[8,9],能够有效减少生活垃圾处理的温室气体排放,也可以降低生活垃圾的管理成本^[10]。国内也有不少研究者对生活垃圾末端处理系统的各种处理方法产生的温室气体排放进行研究^[11-14],认为在末端处理环节通过各固废单元的协同处理,能够实现物质和能量双循环,从而实现减碳效益的最大化^[15-17],但对于源头收集阶段和运输阶段也有少量研究。针对国内大中型城市,有研究者将上海市生活垃圾的生命周期简化为运输阶段和末端处理阶段,研究后发现优化运输路线、减少生活垃圾卫生填埋处置量是重要的减排措施^[18];任越等^[19]以青岛市为例,将垃圾源头分类、末端分类处理方式纳入垃圾处理生命周期中进行生态效率研究,发现源头分类是影响生活垃圾分类处理生态效率的敏感性因素。但对北京市生活垃圾管理系统的温室气体排放的研究,主要关注的还是末端处理阶段^[20-22]。

综合来看,以往的生活垃圾生命周期研究多集中于对个别环节进行分析或者对某类生活垃圾处理技术进行分析,综合运用环境、经济指标并系统的研究生活垃圾收集运输处理生命周期过程的较少。在强制分类背景下,不同分类收集方式如何改变社区垃圾物质流向、流量与后续收运处置过程,进而影响回收处理系统的环境与经济综合绩效,尚未被完全掌握。本文以北京市为例,基于社区实地

调研,以强制分类背景下的不同垃圾投放和收集方式为切入点,研究4类垃圾组成变化及其后续物流去向的异同,总结出5种不同生活垃圾收集运输处理情景,结合物质流分析方法(MFA)、生命周期碳排放量核算(LCCA)和生命周期成本分析方法(LCC),综合分析生活垃圾管理中的碳排放、经济影响及减碳效率,在此基础上为社区生活垃圾“收-运-处”全过程低碳优化提供决策支持。

2 研究范围、情景设置、评估方法和数据来源

2.1 研究范围

本文基于生命周期碳排放量核算(LCCA)与生命周期成本分析(LCC),评价社区垃圾源头分类和综合处理系统的碳排放量和经济成本。功能单位定义为1 t家庭源生活垃圾。系统边界包括家庭源生活垃圾从分类收集到最终处置的全过程,具体如图1所示。社区垃圾分类“收-运-处”全过程涉及的碳排放环节主要包括:①社区垃圾分类收集点资源与能源消耗产生的间接碳排放;②生活垃圾从收集点到垃圾中转站、垃圾中转站到末端处理处置设施(填埋场、焚烧厂、堆肥厂)或再生资源回收利用中心的运输阶段所产生的直接碳排放和间接碳排放;③生活垃圾焚烧产生的碳排放以及热能发电所带来的碳减排量;④焚烧后的炉渣进行填埋处理产生的碳排放;⑤生活垃圾进行堆肥和厌氧发酵产生的碳排放以及堆肥和厌氧发酵获得的产物和电能所

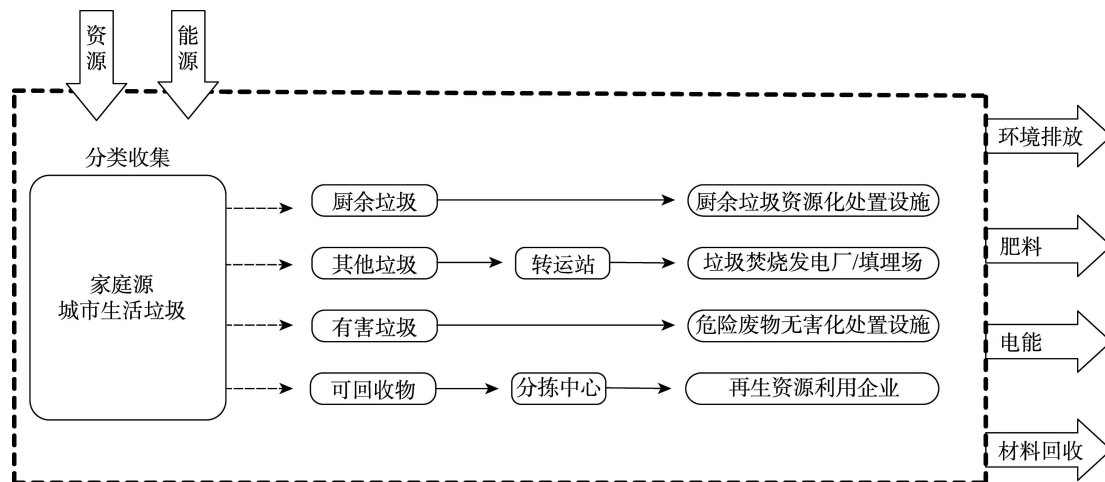


图1 家庭源生活垃圾收-运-处系统边界图

Figure 1 Boundary diagram of the domestic waste collection, transportation, treatment and disposal system

带来的碳减排量;⑥再生资源回收利用获得再生产品所带来的碳减排量。

2.2 情景设置

本文根据北京市垃圾分类工作实施进展,选取大兴区和通州区共10个社区,开展实地调研,以获取家庭源生活垃圾产生和分类情况。调研时间分别为北京实施强制垃圾分类(2020年5月1日)后的第6个月、第9个月、第12个月和第15个月,分别代表4个季节的实际情况。前期调研依据垃圾投放和收集方式的异同,总结出5种生活垃圾分类收集处理情景(图2)。其中,大兴区车站村和通州区一街村对应情景1设置的垃圾分类收集模式;大兴区清城小区(含南区和北区),通州区国风美仑小区和天鹅堡小区,大兴区黄村西里小区和龙兴家园小区,通州区天和家园小区和燕宝家园小区分别对应情

景2、3、4、5设置的垃圾分类收集模式。在开展调研的相应月份,每日7:00—9:00和18:00—20:00两个时间段在垃圾投放点进行定时定点调研,每个小区在每个时间段选取20户的垃圾投放样本,每月共收集1200次垃圾投放样本。采用电子挂钩秤对每户投放的各组分类垃圾进行称重,并将其中投放错误的垃圾分拣出进行称重,投放垃圾的各组分类总重减去错误分类重量得到每户的垃圾准确投放量,最后汇总后取平均值计算得到对应情景的各组分类的准确投放比例。

情景1(S1):投放模式为“居民自主投放+四分类开放式回收桶+暂存点”。收集点配置四分类开放式回收桶,可以全天候投放垃圾,完全凭居民自主投放垃圾,分类收集4类垃圾,厨余垃圾送至厨余垃圾资源化处置设施,其他垃圾经过中转站转运送

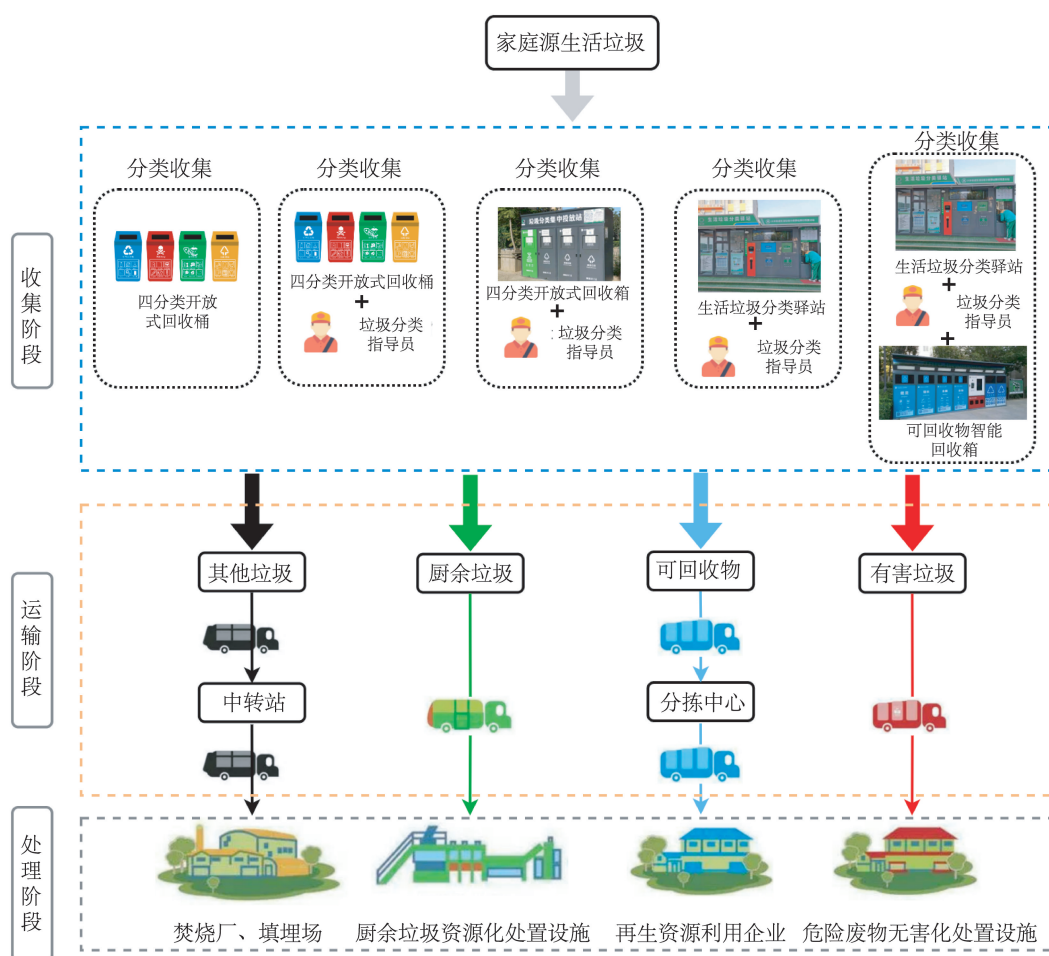


图2 北京市家庭源生活垃圾收集运输处理模式

Figure 2 Collection, transportation, and treatment modes of domestic waste in Beijing

2023年1月

至垃圾焚烧发电厂,焚烧后的灰渣送至填埋场,有害垃圾送至危险废物无害化处置企业,可回收物经过分拣中心,送至再生资源利用企业。

情景2(S2):投放模式为“指导员+四分类开放式回收桶+暂存点”。在收集点配置四分类开放式回收桶,居民可以全天候投放垃圾,并配一个垃圾分类指导员,在工作时间指导居民进行垃圾准确投放,同时将居民分错的部分垃圾分拣出来重新投放到正确的垃圾桶,四分类垃圾的去向与情景1一致。

情景3(S3):投放模式为“指导员+四分类密闭式回收箱+暂存点”。在收集点配置四分类密闭式回收箱,在每天早上和下午各两个小时时间段开放垃圾桶让居民投放垃圾,其余时间垃圾回收箱密闭,不可投放垃圾,垃圾分类指导员在垃圾桶开放时间工作,指导居民进行垃圾的准确投放,准确投放可获取积分,同时将居民分错的部分垃圾分拣出来重新投放到正确的垃圾桶。

情景4(S4):投放模式为“指导员+垃圾分类驿站”。在收集点配置垃圾分类驿站,驿站配有洗涤用品和清洁所需消毒液。垃圾分类驿站垃圾投放时间与情景3一样,也有垃圾分类指导员指导垃圾投放和对错误投放的垃圾进行分拣,同时垃圾分类驿站具有视频宣传指导功能,居民正确投放垃圾后会获得一定的积分用来兑换礼品。

情景5(S5):投放模式为“指导员+垃圾分类驿站+可回收物智能回收箱”。在情景4相同人员和设备配置的基础上,又配置可回收物智能回收箱,居民将可回收物准确投放到可回收物智能回收箱可获得额外的积分用于兑换更多的礼品。

需要指出的是,以上5种情景均是基于现实调研总结出的,其中以垃圾分类收集端完全依靠居民自主投放的S1作为基准情景,S2-S5则是相对S1开

展的模式创新,体现为在分类收集设施或人员配置上进行了改进,后文称为优化情景。据实地调研,从S1到S5,随着各情景对应的投放模式配置逐步完善,厨余垃圾、可回收物和有害垃圾3类关键组分的准确投放比例依次提高(表1)。

2.3 评估方法

2.3.1 生命周期碳排放量核算(LCCA)

(1)收集过程碳排放量核算

收集过程的碳排放对象包括垃圾桶损耗、垃圾分类驿站的电力消耗、居民在驿站投放垃圾后清洗消耗的洗涤用品、驿站进行消毒的消毒液。计算方法参照IPCC指南(2006)^[23],计算公式为:

$$E_{\text{collect}} = \sum_i C_i \cdot EF_i \quad (1)$$

式中: E_{collect} 为垃圾收集过程中CO₂排放当量(kg); C_i 为收集过程中第*i*种活动的活动水平(kg); EF_i 为收集过程中第*i*种活动的排放因子(kgCO₂e/kg)。

(2)运输过程碳排放量核算

经过实地调研,在所有情景中的垃圾运输均使用柴油清运车进行运输,运输过程中默认垃圾不产生碳排放,因此,此过程的碳排放主要为运输过程中清运车消耗柴油所产生,其计算方法参照IPCC指南(2006)^[23]建立的CO₂排放公式,计算公式为:

$$E_{\text{transport}} = \sum_j \varepsilon_j \cdot E_j \quad (2)$$

式中: $E_{\text{transport}}$ 为运输过程CO₂排放当量(kg); ε_j 为第*j*种能源的CO₂排放因子(kgCO₂e/kg); E_j 为第*j*种能源消耗量(kg)。

(3)垃圾焚烧碳排放量核算

垃圾焚烧的温室气体排放估算参考IPCC以及北京市出台的关于垃圾焚烧的标准《温室气体排放核算指南 生活垃圾焚烧企业》(标准号:DB11/T 1416-2017)^[24]。本文在焚烧阶段产生的温室气体考

表1 5种分类收集处理情景对应的准确分类比例

Table 1 Accurate classification proportion corresponding to five source separation collection and processing scenarios

情景	S1	S2	S3	S4	S5
厨余垃圾准确分类比例/%	25.1	29.5	32.6	35.1	35.1
可回收物准确分类比例/%	69.8	82.1	83.7	90.7	97.7
有害垃圾准确分类比例/%	34.0	40.0	44.2	47.6	47.6
其他垃圾容错情况	厨余垃圾、有害垃圾与可回收物中未分类或分类错误部分全进入其他垃圾				

注:准确分类比例=某垃圾组分正确投放量/该垃圾组分家庭实际产生量。

考虑CO₂和N₂O,CH₄忽略不计。生活垃圾焚烧所产生的温室气体主要包括焚烧过程矿物碳焚烧造成的直接碳排放及企业运转消耗的电引起的碳排放。垃圾焚烧过程矿物碳造成的直接碳排放来源于垃圾中的矿物碳以及助燃剂燃烧这两个部分。本文假设垃圾焚烧发电厂使用自身焚烧产生的电,剩余的电量再上网。则生活垃圾焚烧过程的碳排放由两部分构成,一是垃圾焚烧过程造成的碳排放,包括生活垃圾中矿物碳燃烧产生的碳排放和助燃剂燃烧产生的碳排放,另一部分则是发电上网的碳减排量,具体计算公式为:

$$E_{\text{incinerate}} = E_{\text{direct}} - E_{\text{electricity}} \quad (3)$$

$$E_{\text{direct}} = E_{\text{CO}_2} + E_{\text{N}_2\text{O}} + E_{\text{fuel}} \quad (4)$$

式中: $E_{\text{incinerate}}$ 为垃圾焚烧总碳排放量(t); E_{direct} 为垃圾焚烧过程产生的直接碳排放量(t); $E_{\text{electricity}}$ 为焚烧垃圾发电上网避免的碳排放量(t); E_{CO_2} 为生活垃圾中矿物碳燃烧产生的碳排放量(t); $E_{\text{N}_2\text{O}}$ 为焚烧过程N₂O的碳排放量(t); E_{fuel} 为生活垃圾焚烧添加的化石燃料燃烧产生的碳排放量(t)。

(4) 垃圾填埋碳排放量核算

因为北京城市垃圾分类成效初显,做到原生垃圾零填埋,本文考虑垃圾填埋的碳排放量是由垃圾焚烧后的灰渣填埋产生的碳排放量,焚烧灰渣一般为入炉垃圾的20%,其中,填埋产生的CO₂被视为生物碳分解产生的,所生成的CO₂不计入碳排放,计算公式如下:

$$E_{\text{landfill}} = MSW_{\text{landfill}} \cdot EF_{\text{landfill}} \quad (5)$$

式中: E_{landfill} 为垃圾填埋的CO₂排放当量(kg); MSW_{landfill} 为垃圾填埋量(kg); EF_{landfill} 为垃圾填埋的碳排放因子(kgCO₂e/kg)。

(5) 厨余垃圾资源化处理碳排放量核算

北京市厨余垃圾资源化处理方法主要有堆肥和厌氧发酵两种,其中堆肥占比77%,厌氧发酵占比23%^[25]。

厨余垃圾处理产生的CO₂被视为生物碳分解产生的,所生成的CO₂不计入碳排放。厨余垃圾堆肥的碳排放量核算计算公式如下:

$$E_{\text{compost}} = E_{\text{CH}_4} + E_{\text{N}_2\text{O}} \quad (6)$$

$$E_{\text{CH}_4} = MSW_{\text{compost}} \cdot EF_{\text{CH}_4} \cdot GWP_{\text{CH}_4} \cdot 10^{-3} \quad (7)$$

$$E_{\text{N}_2\text{O}} = MSW_{\text{compost}} \cdot EF_{\text{N}_2\text{O}} \cdot GWP_{\text{N}_2\text{O}} \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

式中: E_{compost} 为垃圾堆肥的CO₂排放当量(kg); E_{CH_4} 为垃圾堆肥过程的碳排放量(kg); $E_{\text{N}_2\text{O}}$ 为垃圾堆肥过程N₂O的碳排放量(kg); MSW_{compost} 为堆肥的厨余垃圾量(t); EF_{CH_4} 为堆肥过程中甲烷(CH₄)的排放因子(gCH₄/kg); $EF_{\text{N}_2\text{O}}$ 为堆肥过程中氧化亚氮(N₂O)的排放因子(gN₂O/kg MSW); GWP_{CH_4} 为CH₄全球变暖潜势; $GWP_{\text{N}_2\text{O}}$ 为N₂O全球变暖潜势。

(6) 可回收物再生利用碳排放量核算

可回收物回收利用可以替代相关产品的生产,从而节约原材料生产所需的能源消耗量,本文考虑家庭源生活垃圾中最大的可回收物种类:废塑料、废纸、废金属,处理1.0 t废钢铁可得新料0.9 t,处理1.0 t废塑料可得0.7 t二级原料,处理1.0 t废纸可得0.85 t再生纸^[26]。

$$E_{\text{recyclable}} = MSW_{\text{recyclable}} \cdot EF_{\text{recyclable}} \quad (9)$$

式中: $E_{\text{recyclable}}$ 为可回收物处理的CO₂排放当量(kg); $MSW_{\text{recyclable}}$ 为可回收物处理量(kg); $EF_{\text{recyclable}}$ 为可回收物处理的碳排放因子(kgCO₂e/kg)。

(7) 有害垃圾处理碳排放量核算

有害垃圾的碳减排核算公式如下:

$$E_{\text{hazardous}} = MSW_{\text{hazardous}} \cdot EF_{\text{hazardous}} \quad (10)$$

式中: $E_{\text{hazardous}}$ 为有害垃圾处理的CO₂排放当量(kg); $MSW_{\text{hazardous}}$ 为有害垃圾处理量(kg); $EF_{\text{hazardous}}$ 为有害垃圾处理的碳排放因子(kgCO₂e/kg)。

2.3.2 生命周期成本核算(LCC)

生活垃圾收运处生命周期过程的成本(CB)包括前端收集阶段的投入成本,运输过程的成本以及4类垃圾各处理环节的处理成本,具体计算公式如下:

$$CB = CB_{\text{collect}} + CB_{\text{transport}} + CB_{\text{disposal}} \quad (11)$$

式中: CB_{collect} 、 $CB_{\text{transport}}$ 、 CB_{disposal} 分别为收集、运输、处理处置阶段的经济成本(元)。

2.3.3 减碳效率

在对生活垃圾收集运输处理过程的几种情景开展生命周期评价及成本分析的基础上,结合生命周期碳排放和生命周期成本二维指标,提出减碳效

2023年1月

率指标,对各优化情景相对于基准情景的环境与经济协同效应进行评估。本文提出将不同优化情景和基准情景在生命周期碳排放量上的差值与该优化情景和基准情景在生命周期成本上的差值的比值界定为减碳效率。减碳效率越高,即优化情景以较小的生命周期成本增加带来较多的生命周期碳减排量。减碳效率计算公式如下:

$$CRE_k = \frac{LCCE_k - LCCE}{LCC_k - LCC} \quad (12)$$

式中: CRE_k 表示第 k 个优化情景相对于基准情景的减碳效率,其中 $k=1,2,3,4$; $LCCE_k$ 和 $LCCE$ 分别为第 k 个优化情景和基准情景的生命周期碳排放; LCC_k 和 LCC 分别为第 k 个优化情景和基准情景的生命周期成本。当 $LCCE_k < LCCE$ 且 $LCC_k > LCC$ 时,减碳效率为正值,代表单位经济成本增加带来的碳减排量;当 $LCCE_k < LCCE$ 且 $LCC_k < LCC$ 时,减碳效率为负值,表示优化情景以低于现实系统的经济成本即可获得生命周期碳减排,也即实现环境经济的协同改善作用,且负值的绝对值越大,协同改善效果越显著。

2.4 数据来源

本文中有关生命周期碳排放量核算和生命周期成本分析涉及的关键参数主要来自行业调研、现场调查、GaBi数据库和文献等。表2和表3分别列示了生活垃圾收集、运输、处理各环节生命周期碳排放量核算和生命周期成本分析的数据来源。

3 结果与分析

3.1 生活垃圾物质流分析

调研数据经整理后分析得到北京市四分类垃圾组分情况(表4),其中,厨余垃圾的量占比最大,其次是可回收物的量,有害垃圾的量很少。厨余垃圾进行堆肥或者厌氧消化,可回收物进行回收再利用,其他垃圾焚烧发电,都能获得一定的环境效益和经济效益。相应地,5种情景下的四分类垃圾物质流情况如图3所示。

其中,S1-S5的4类垃圾收集运输处理的物质流向相同,不同情景中4类垃圾的物质流量由于垃圾分类投放准确率的的不同而有所差别。从S1到S5,每收集1t生活垃圾,从收集点经过中转站最后

表2 各环节生命周期碳排放量核算数据来源

Table 2 The data source of life cycle carbon accounting

数据来源	数据项	参考文献
文献	洗涤用品碳排放因子	[27]
	华北电网电力碳排放因子	[28]
	柴油燃烧的碳排放因子	[29]
	垃圾焚烧及发电环节相关的碳排放(碳减排)因子	[30]
	堆肥相关的碳排放因子	[31-34]
	厌氧消化的碳排放因子	[35]
	废钢铁、废纸、废塑料回收减排效率	[36]
GaBi数据库	可回收物中废塑料、废纸、废钢铁占比	[37]
	垃圾桶碳排放因子、消毒液碳排放因子、柴油生产的碳排放因子、垃圾填埋碳排放因子、有害垃圾处理碳排放因子	—
	垃圾收运处各环节平均运输距离	—

表3 各环节生命周期成本分析数据来源

Table 3 The data source of life cycle cost

数据来源	数据项	参考文献
文献	焚烧总成本、填埋总成本	[38]
	堆肥处理总成本(含收益)、厌氧处理总成本(含收益)	[39]
调研	分类指导员工资、易耗品费用、垃圾分类收运设施运行及折旧费、垃圾清运成本、有害垃圾处置成本、废金属处理成本(含收益)、废塑料处理成本(含收益)、废纸处理成本(含收益)	—

到达垃圾焚烧厂焚烧的其他垃圾的量分别为699.00 kg、645.88 kg、623.73 kg、593.63 kg、578.59 kg;运输到厨余垃圾资源化处置设施进行堆肥和厌氧发酵处理的厨余垃圾的量分别为148.06 kg、174.20 kg、192.49 kg、207.30 kg、207.30 kg;经分拣中心到达再生资源利用企业进行再生利用的可回收物的量分别为150.39 kg、176.92 kg、180.46 kg、195.50 kg、210.54 kg;运输到危险废物无害化处置设施进行无害化处理的有害垃圾的量分别为2.55 kg、3.00 kg、3.32 kg、3.57 kg、3.57 kg。从S1到S5,厨余垃圾、可回收物、有害垃圾的分出量增加,其他垃圾的分出量减少,随着前端收集设施的完善和垃圾分类指导员的配备,居民的垃圾投放准确率逐渐

表4 北京市家庭源生活垃圾组分表(kg/t)

Table 4 Composition of 1 ton of domestic waste in Beijing (kg/t)

垃圾分类	其他垃圾	厨余垃圾	有害垃圾	可回收物
含量	186.5	590.5	7.5	215.5

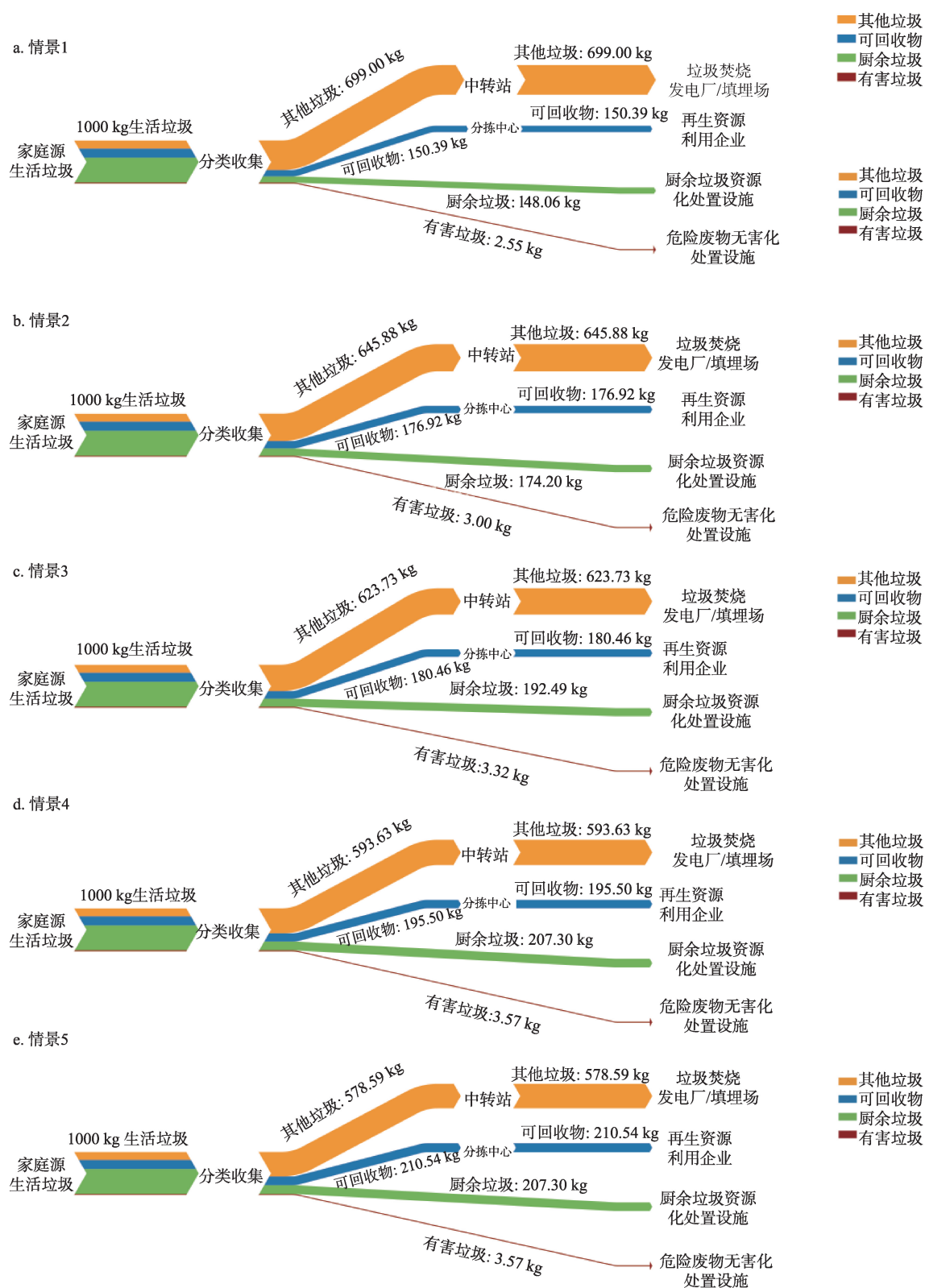


图3 不同情景下四分类垃圾物质代谢流动图

Figure 3 Metabolic flow diagrams of four categories of waste under different scenarios

2023年1月

提高。

3.2 生命周期碳排放量核算(LCCA)分析

运用生命周期碳排放量核算框架,对北京市5种情景下城市生活垃圾分类收集处理系统各主要阶段的温室气体排放进行了量化比较,5种情景的生命周期碳排放量如表5所示。随着源头分类收集体系的完善,虽然增加了前端分类收集环节的碳排放量,但有效提高了后端分类处理效率及再生资源(能源)产出率,带来碳减排效益,S1-S5的碳减排量逐渐增加。

5种情景收运处生命周期碳排放结果如图4所示。从S1到S5,1 t生活垃圾经收集运输处理全过程的碳足迹分别为-148.14 kgCO₂e、-236.44 kgCO₂e、-251.25 kgCO₂e、-297.06 kgCO₂e、-343.51 kgCO₂e,碳足迹结果均为负值,表明生活垃圾分类收集运输处理具有正向的环境效益。从S1到S5,碳减排效益依次提升,主要差别来自处理环节可回收物资源

化处理后的再生材料产出量的不同。从S1到S5,可回收物资源化的碳足迹分别为-425.23 kgCO₂e、-500.27 kgCO₂e、-510.28 kgCO₂e、-552.80 kgCO₂e、-595.33 kgCO₂e,可回收物处理环节的碳减排效益依次提升。收集环节由于有垃圾桶、洗涤用品、消毒剂、电能等的投入,碳排放表现为正值,S1-S5的分类收集环节的碳足迹分别为0.03 kgCO₂e、0.03 kgCO₂e、0.06 kgCO₂e、4.28 kgCO₂e、4.81 kgCO₂e。运输环节由于有柴油的投入,碳排放表现为正值,S1-S5的运输环节的碳足迹分别为60.98 kgCO₂e、60.62 kgCO₂e、60.47 kgCO₂e、60.27 kgCO₂e、60.17 kgCO₂e。在末端处理环节,除可回收物外,其他垃圾、厨余垃圾、有害垃圾的碳排放均为正值。具体来看,从S1到S5,其他垃圾处理的碳排放量分别为202.15 kgCO₂e、186.79 kgCO₂e、180.38 kgCO₂e、171.68 kgCO₂e、171.68 kgCO₂e;厨余垃圾处理的碳排放量分别为13.16 kgCO₂e、15.48 kgCO₂e、17.11 kgCO₂e、18.42 kgCO₂e、18.42 kgCO₂e;有害垃圾处理的碳排放量为0.78 kgCO₂e、0.91 kgCO₂e、1.01 kgCO₂e、1.09 kgCO₂e、1.09 kgCO₂e。厨余垃圾由于厌氧消化带来的碳减排效益与堆肥产生的碳排放抵消,总的碳排放较低;有害垃圾由于产生量少,产生的碳排放也较少。

将生活垃圾管理系统划分为分类收集、分类运输、其他垃圾处理、厨余垃圾处理、可回收物处理、有害垃圾处理6个环节,分析各环节对碳足迹的贡献,结果如图5所示。其中,对生命周期碳足迹的贡献主要来自于可回收物处理环节,从S1到S5,可回收物处理环节的贡献值分别为287.04%、211.58%、203.09%、186.09%、1173.31%。在分类收集、分类运输、其他垃圾处理、厨余垃圾处理、有害垃圾处理环节中,由于材料的投入和能源的消耗导致其对生命周期碳足迹呈现正向环境影响,贡献值为负值,其中分类收集环节和有害垃圾处理环节的碳排放贡献较少,可忽略不计。从S1到S5,分类运输环节的贡献值分别为-41.16%、-25.64%、-24.07%、-20.29%、-17.52%;其他垃圾处理环节的贡献值分别为-136.46%、-79.00%、-71.19%、-57.79%、-48.71%;厨余垃圾处理环节的贡献值分别为

表5 不同情景生命周期碳排放量 (kgCO₂e)

Table 5 Life cycle carbon emissions under different scenarios (kgCO₂e)

情景	分类收集	分类运输	分类处理	总计
S1	0.03	60.98	-209.15	-148.14
S2	0.03	60.62	-297.10	-236.44
S3	0.06	60.47	-311.78	-251.25
S4	4.28	60.27	-361.62	-297.06
S5	4.81	60.17	-408.49	-343.51

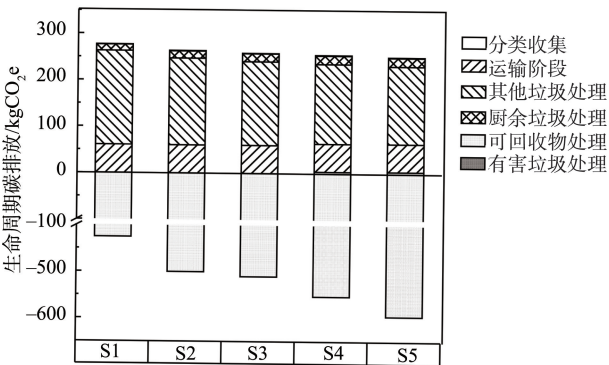


图4 不同情景收运处生命周期碳排放

Figure 4 Life cycle carbon emissions of collection and transportation under different scenarios

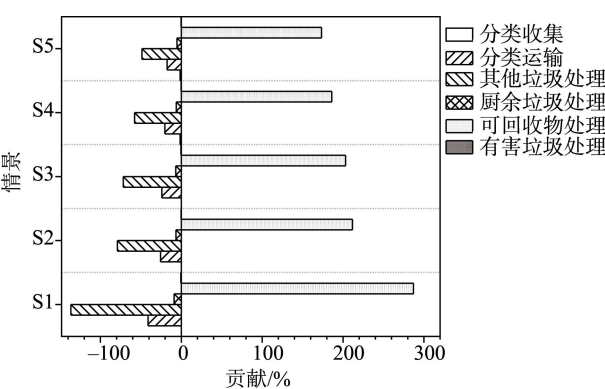


图5 不同情景各生命周期阶段碳排放贡献

Figure 5 Contribution of carbon emissions in different life cycle stages of different scenarios

-8.88%、-6.55%、-6.81%、-6.20%、-5.36%。

研究结果显示,在5种情景中,收集过程的碳排放占整个过程的比例很小,与其他环节相比都微不足道,但是收集环节的分类模式会直接影响四分类垃圾的分类准确率,从而影响生命周期碳排放量核算的结果。

3.3 生命周期成本(LCC)分析

生活垃圾管理的生命周期成本主要由分类收集成本、分类运输成本、其他垃圾处理成本、厨余垃圾处理成本、可回收物处理成本和有害垃圾处理成本所组成。不同情景各阶段的生命周期成本如表6所示。基于各环节数据计算得出,S1-S5的生命周期成本分别为149.68元、217.25元、224.46元、239.58元、238.39元。5种情景的生命周期成本从大到小依次为:S4>S5>S3>S2>S1。

5种情景的经济收益均来自可回收物资源化处

表6 北京市生活垃圾不同情景LCC评价结果(元)

Table 6 Cife cycle cost (LCC) results of different scenarios of municipal solid waste in Beijing (yuan)

项目	S1	S2	S3	S4	S5
收集	6.00	94.00	104.02	130.72	141.02
运输	90.99	90.46	90.24	89.94	89.79
厨余垃圾	20.66	24.31	26.86	28.93	28.93
可回收物	-88.53	-104.15	-106.24	-115.09	-123.94
有害垃圾	4.93	5.79	6.40	6.90	6.90
其他垃圾	115.63	106.84	103.18	98.20	95.71
总计	149.68	217.25	224.46	239.58	238.39

理获得的再生材料所带来的收益,且随着垃圾分类投放准确率的提高,回收的可回收物增多,获得的经济收益也增加。S1-S5的可回收物再生利用的经济收益分别为88.53元、104.15元、106.24元、115.09元、123.94元。由于收集环节、运输环节需要能源和资源的投入,成本均为正值,其他垃圾处理和厨余垃圾处理环节虽有电能和肥料所获得的收益,但收益不足以抵消投入成本,成本表现为正值,其中,在收集环节,由于4种优化情景投入了相关垃圾分类设施和垃圾分类指导员,加上能源和材料的投入,使得S1-S5收集端的成本逐渐增加,分别为6.00元、94.00元、104.02元、130.72元、141.02元。至于运输环节,由于都是分类运输,各情景间成本相差不大。

3.4 减碳效率分析

根据生命周期碳排放和生命周期成本二维指标,对几种优化情景相对于基准情景的减碳效率进行评估,结果如表7所示。从碳减排和经济成本来看,相对于S1,其余4种情景碳减排贡献均有改善,且减排量依次增加,但在经济成本方面也相应提高,主要原因在于各情景在收集端均投入较高成本以确保垃圾分类投放准确率的提高。在减碳效率值上,从S2到S5依次升高,分别为1.31、1.38、1.66、2.20。基于前文界定的减碳效率定义可知,每增加1元的经济成本投入,从S2到S5,可分别实现减碳1.31 kgCO₂e、1.38 kgCO₂e、1.66 kgCO₂e、2.20 kgCO₂e,S5减碳效率最为最佳。

表7 4种优化情景减碳效率表

Table 7 Carbon reduction efficiency of four optimization scenarios

情景	碳减排量增加值/kgCO ₂ e	经济成本增加值/元	减碳效率
S2	88.30	67.57	1.31
S3	103.11	74.78	1.38
S4	148.92	89.91	1.66
S5	195.36	88.72	2.20

4 结论

本文围绕北京市生活垃圾分类回收处理背景,聚焦家庭源生活垃圾产生特征,对社区生活垃圾的分类收集、运输、处理全过程开展调研和数据收集,

2023年1月

综合运用生命周期碳排放量核算方法和生命周期成本分析方法建立减碳效率模型,在基准情景(S1)的基础上,对其余4种情景(S2-S5)的减碳贡献进行了系统分析。

(1)5种情景中,生命周期碳减排量由高到低排序为S5>S4>S3>S2>S1,碳减排量最高可达343.51 kgCO₂e,最低为148.14 kgCO₂e;生命周期成本由高到低为S4>S5>S3>S2>S1,成本值最高为239.58元,最低为149.68元。相比基准情景,S2-S5均具有碳减排效益,得益于焚烧发电和再生材料的产出;与此同时,S2-S5分类收运和处理成本均增加,主要贡献来自分类指导员薪酬支出和分类收集设施运行成本。

(2)与基准情景相比,S2-S5在投放和收集环节提高了生活垃圾的分类准确率,均表现为正向的减碳效率,其中S5对应的“垃圾分类驿站+可回收物智能回收箱+垃圾分类指导员”优化模式综合表现最佳。

(3)随着分类收集模式不断优化,垃圾分类“收运处”系统生命周期减碳效率逐步提升。在垃圾综合处理能力和各组分处理能力充足的情况下,准确分类比例越高,理论上的减碳效率值也越高。然而,在垃圾处理能力不足或垃圾资源化产品市场空间不足的地区,若存在“先分后混”的情形,将影响“收运处”系统的减碳效率。

(4)源头分类收集体系的建立,增加了前端基础设施运行成本、人力成本和环境影响,但有效提高了后端分类处理效率及再生资源(能源)产出率,带来碳减排效益。在垃圾分类推广期,分类指导员和分拣员等人员配备导致成本上升。后期随着居民分类投放参与率和准确率上升,人员投入成本将大幅降低,减碳效率可望进一步提升。

参考文献(References):

- [1] 郑逸璇,宋晓晖,周佳,等.减污降碳协同增效的关键路径与政策研究[J].中国环境管理,2021,13(5):45-51.[Zheng Y X, Song X H, Zhou J, et al. Synergetic control of environmental pollution and carbon emissions: Pathway and policy[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(5): 45-51.]
- [2] 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话(全文)

- [N/OL]. (2020-09-22) [2022-10-09]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1678546987763904095&wfr=spider&for=pc>. [Xi Jinping's Speech at the General Debate of the 75th United Nations General Assembly (Full Text)[N/OL]. (2020-09-22) [2022-10-09]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1678546987763904095&wfr=spider&for=pc>.]
- [3] 狄乾斌,陈小龙,侯智文.“双碳”目标下中国三大城市群减污降碳协同治理区域差异及关键路径识别[J].资源科学,2022,44(6):1155-1167.[Di Q B, Chen X L, Hou Z W. Regional differences and key pathway identification of the coordinated governance of pollution control and carbon emission reduction in the three major urban agglomerations of China under the “Double-Carbon” targets [J]. Resources Science, 2022, 44(6): 1155-1167.]
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部.中国城乡建设统计年鉴2020[M].北京:中国统计出版社,2020.[Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. China Urban-Rural Construction Statistical Yearbook 2020[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.]
- [5] Gabriel A K, William K. Estimating greenhouse gas emissions from municipal solid waste management in Depok, Indonesia[J]. City and Environment Interactions, 2019, DOI: 10.1016/j.ca-cint.2020.100027.
- [6] Michel D P, Agamuthu P, Mehran S, et al. Implications of municipal solid waste management on greenhouse gas emissions in Malaysia and the way forward[J]. Waste Management, 2021, DOI: 10.1016/j.wasman.2020.09.038.
- [7] Chew Z T, Hoy Z X, Woon K S, et al. Integrating greenhouse gas reduction and waste policy targets to identify optimal waste treatment configurations via carbon emission pinch analysis[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, DOI: 10.1016/j.psep.2022.02.060.
- [8] Wang D, Tang Y T, Sun Y, et al. Assessing the transition of municipal solid waste management by combining material flow analysis and life cycle assessment[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2022, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105966.
- [9] Paul T, Quetzalli A, Liliana M. Recyclables valorisation as the best strategy for achieving landfill CO₂e emissions abatement from domestic waste: Game theory[J]. Sustainability, 2017, DOI: 10.3390/su9071154.
- [10] Ooi J K, Woon K S, Hashim H. A multi-objective model to optimize country-scale municipal solid waste management with economic and environmental objectives: A case study in Malaysia[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.128366.
- [11] 张智慧,王媛,柴立和,等.城市垃圾与污水污泥资源化处置方案对比:基于两种生命周期影响评价方法[J].资源科学,2022,

- 44(4): 860–870. [Zhang Z H, Wang Y, Chai L H, et al. Comparison of energy-based disposal schemes for municipal solid waste and sewage sludge: Based on two life cycle assessment methods[J]. Resources Science, 2022, 44(4): 860–870.]
- [12] 郭宇杰, 龚亚萍, 邹玉飞, 等. 天津市生活垃圾处理碳排放时间变化特征及影响因素[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(3): 834–842. [Guo Y J, Gong Y P, Zou Y F, et al. Temporal variation characteristics and influencing factors of carbon emissions from municipal solid waste treatment in Tianjin[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(3): 834–842.]
- [13] Wang Y, Shi Y, Zhou J Z, et al. Implementation effect of municipal solid waste mandatory sorting policy in Shanghai[J]. Journal of Environmental Management, 2021, DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113512.
- [14] Chen S S, Huang J L, Xiao T T, et al. Carbon emissions under different domestic waste treatment modes induced by garbage classification: Case study in pilot communities in Shanghai, China[J]. The Science of the Total Environment, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137193.
- [15] 龙吉生, 杜海亮, 邹昕, 等. 关于城市生活垃圾处理碳减排的系统研究[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(8): 1143–1153. [Long J S, Du H L, Zou X, et al. Systematic study on carbon emission reduction of municipal solid waste treatment[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(8): 1143–1153.]
- [16] 姚雁彬. “碳中和”愿景下我国城市生活垃圾低碳管理研究: 时空演化、驱动因素、减排路径[D]. 扬州: 扬州大学, 2022. [Yao Y B. Research on Low-carbon Management of Chinese Municipal Solid Waste under the Vision of “Carbon Neutralization”: Temporal and Spatial Evolution, Driving Factors and Emission Reduction Paths[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.]
- [17] Chu X, Jin Y Y, Wang X, et al. The Evolution of the spatial-temporal differences of municipal solid waste carbon emission efficiency in China[J]. Energies, 2022, DOI: 10.3390/EN15113987.
- [18] Jiang Y H, Zhang H, He J J, et al. Carbon Emission of Municipal Solid Waste in Shanghai[C]. Wuhan: Proceedings of 2020 International Conference on Green Energy, Environment and Sustainable Development (GEESD 2020), 2020.
- [19] 任越, 杨俊杰. 生活垃圾分类处理方式的生态效率评价[J]. 中国环境科学, 2020, 40(3): 1166–1175. [Ren Y, Yang J J. Eco-efficiency assessment of municipal solid waste sorting treatment mode [J]. China Environmental Science, 2020, 40(3): 1166–1175.]
- [20] 李颖, 武学, 孙成双, 等. 基于低碳发展的北京城市生活垃圾处理模式优化[J]. 资源科学, 2021, 43(8): 1574–1588. [Li Y, Wu X, Sun C S, et al. Optimization of Beijing municipal solid waste treatment model based on low-carbon development[J]. Resources Science, 2021, 43(8): 1574–1588.]
- [21] 刘春红, 郝学军, 刘枫. 北京市城市生活垃圾处理温室气体排放特征及减排策略[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(4): 1041–1047. [Liu C H, Hao X J, Liu F. Greenhouse gas emission characteristics and emission reduction strategies of municipal solid waste treatment in Beijing[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(4): 1041–1047.]
- [22] 孙月阳, 宋国君, 张大为, 等. 生活垃圾管理社会成本评估方法与应用: 以北京市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(9): 1–9. [Sun Y Y, Song G J, Zhang D W, et al. Social cost accounting for municipal solid waste management in Beijing[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(9): 1–9.]
- [23] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R]. United Nations: IPCC, 2015.
- [24] 北京市质量技术监督局. 温室气体排放核算指南 生活垃圾焚烧企业[R/OL]. (2017–06–29) [2022–12–10]. <https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed?id=91D99E4D8F832E24E05397BE0A0A3A10>. [Beijing Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision. Guidelines of Accounting of Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Wastes Incineration Enterprise[R/OL]. (2017–06–29) [2022–12–10]. <https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed?id=91D99E4D8F832E24E05397BE0A0A3A10>.]
- [25] 张烨, 姜薇, 韩莉, 等. 北京市厨余垃圾资源化标准现状[J]. 再生资源与循环经济, 2022, 15(3): 21–24. [Zhang Y, Jiang W, Han L, et al. Current situation of standardization of food waste resource in Beijing[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2022, 15(3): 21–24.]
- [26] 张秀芳, 龚小梅, 占小洋, 等. 垃圾分类之自动识别技术探索[J]. 科技创新与应用, 2021, (1): 178–180. [Zhang X F, Gong X M, Zhan X Y, et al. Exploration of automatic identification technology for garbage classification[J]. Technology Innovation and Application, 2021, (1): 178–180.]
- [27] 北京生态设计与绿色制造促进会. 香皂产品生命周期评价报告[R/OL]. (2019–11–20) [2022–10–09] <https://max.book118.com/html/2019/1106/7063142002002101.shtm>. [Beijing Association of Green Design and Green Manufacturing Promotion. Life Cycle Assessment Report of Soap Products[R/OL]. (2019–11–20) [2022–10–09]. <https://max.book118.com/html/2019/1106/7063142002002101.shtm>.]
- [28] 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心. 2011年和2012年中国区域电网平均二氧化碳排放因子[EB/OL]. (2014–09–16) [2022–10–09]. <https://www.ccchina.org.cn/archiver/ccchina.cn/UpFile/Files/Default/20140923163205362312.pdf>. [National Center for Climate Change Strategy and International Cooperation. Average Carbon Dioxide Emission Factors of Regional Power Grids in China in 2011 and 2012[EB/OL]. (2014–09–16) [2022–10–09]. <https://www.ccchina.org.cn/archiver/ccchina.cn/UpFile/Files/Default/20140923163205362312.pdf>.]

2023年1月

- [29] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 陆上交通运输企业温室气体排放核算方法与报告指南[R/OL]. (2015-11-11) [2022-10-09]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcflb/tz/201511/W020190905506438255108.pdf>. [National Development and Reform Commission. Guidelines for Accounting Methods and Reporting of Greenhouse Gas Emissions from Land Transport Enterprises[R/OL]. (2015-11-11) [2022-10-09]. <https://www.ccchina.org.cn/archiver/ccchina.cn/UpFile/Files/Default/20140923163205362312.pdf>.]
- [30] 王龙, 李颖. 北京市生活垃圾焚烧发电厂温室气体排放及影响因素[J]. 环境工程学报, 2017, 11(12): 6490-6496. [Wang L, Li Y. Greenhouse gas(GHG) emissions and its influencing factors in Beijing municipal solid waste incineration power plant[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(12): 6490-6496.]
- [31] Saer A, Lansing S, Davitt N H, et al. Life cycle assessment of a food waste composting system: Environmental impact hotspots[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 52: 234-244.
- [32] 边潇, 宫徽, 阎中, 等. 餐厨垃圾不同“收集-处理”模式的碳排放估算对比[J]. 环境工程学报, 2019, 13(2): 449-456. [Bian X, Gong H, Yan Z, et al. Comparison of carbon emission estimation among different “collection-disposal” modes for food waste[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(2): 449-456.]
- [33] Tauber J, Parravicini V, Svardal K, et al. Quantifying methane emissions from anaerobic digesters[J]. Water Science & Technology, 2019, 80(9): 1654-1661.
- [34] 李欢, 周颖君, 刘建国, 等. 我国厨余垃圾处理模式的综合比较和优化策略[J]. 环境工程学报, 2021, 15(7): 2398-2408. [Li H, Zhou Y J, Liu J G, et al. Comprehensive comparison and optimal strategies of food waste treatment modes[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(7): 2398-2408.]
- [35] 陈海滨, 刘金涛, 钟辉, 等. 厨余垃圾不同处理模式碳减排潜力分析[J]. 中国环境科学, 2013, 33(11): 2102-2106. [Chen H B, Liu J T, Zhong H, et al. Analysis of potential carbon reduction for different food waste processing mode[J]. China Environmental Science, 2013, 33(11): 2102-2106.]
- [36] 黄威, 高庆先, 曹国良, 等. 中国城市矿产开发对温室气体减排的影响分析[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(1): 76-82. [Huang W, Gao Q X, Cao G L, et al. Effect of China's urban symbiosis development on GHG emission reduction[J]. Climate Change Research, 2017, 13(1): 76-82.]
- [37] 中华人民共和国商务部. 中国再生资源回收行业发展报告(2020)[R/OL]. (2021-06-30) [2022-10-13]. <http://ltfzs.mofcom.gov.cn/article/ztzn/202106/20210603171351.shtml>. [Ministry of Commerce of the People's Republic of China. Report on the Development of China's Renewable Resources Recycling Industry (2020)[R/OL]. (2021-06-30) [2022-10-13]. <http://ltfzs.mofcom.gov.cn/article/ztzn/202106/20210603171351.shtml>.]
- [38] 于诗桐. 城市生活垃圾焚烧生命周期环境绩效评价及成本收益分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2020. [Yu S T. Lifecycle Environmental Performance Assessment and Cost-benefit Analysis of Municipal Solid Waste Incineration[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.]
- [39] 卫潘明. 北京地区厨余垃圾处理机全成本分析[J]. 城市管理与科技, 2017, 19(6): 52-55. [Wei P M. Analysis of the total cost of kitchen waste disposer in Beijing[J]. Urban Management and Science & Technology, 2017, 19(6): 52-55.]

Carbon reduction efficiency of community domestic waste separation at source and comprehensive treatment system under compulsory classification

DING Meng¹, SONG Xiaolong^{1,2}, BAI Jianfeng^{1,2}, ZHUANG Xuning^{1,2}, ZHAO Jing^{1,2},
LI Weiming³, LUO Wei⁴

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China; 2. Shanghai Collaborative Innovation Center for WEEE Recycling, Shanghai 201209, China; 3. Institute of Resources and Environmental Policy, Development Research Center of the State Council, Beijing 100010, China; 4. Beijing Jinghuan Intelligent Environmental Protection Technology Co., Ltd, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] In the context of compulsory classification, different source separation and collection methods will change the flow direction of municipal solid waste and the subsequent

collection and disposal process, and then affect the life cycle carbon emissions and economic performance of the recycling system. According to the different scenarios of Beijing community garbage source classification and comprehensive treatment system, this study carried out carbon reduction efficiency analysis and optimization, in order to provide a scientific basis for the establishment of garbage classification and collection model according to local conditions.

[Methods] The material flow analysis method (MFA) was used to analyze the material flow direction and flow in the whole process of recycling and treatment, and evaluated the carbon footprint and economic cost respectively with life cycle carbon emission accounting (LCCA) and life cycle cost analysis (LCC) methods. On this basis, a carbon reduction efficiency index was put forward and optimized. **[Results]** The life cycle carbon emissions of the baseline scenario (S1) and the optimization scenario (S2-S5) are -148.14 kgCO₂e, -236.44 kgCO₂e, -251.25 kgCO₂e, -297.06 kgCO₂e, -343.51 kgCO₂e, respectively. Compared with S1, the four optimization scenarios show positive carbon reduction efficiency, and the carbon reduction efficiency values are S5 (2.20)>S4 (1.66)>S3(1.38)>S2 (1.31). Scenario 5 corresponding to the “garbage sorting station+recyclable intelligent recycling bin+garbage classification instructor” optimization model has the highest carbon reduction efficiency. Under the premise that the comprehensive treatment capacity of domestic waste and the treatment capacity of each component are sufficient, with the increase of the proportion of accurate classification, the carbon reduction efficiency is gradually improved.

[Conclusion] The establishment and improvement of the source separation and collection system increases the front-end infrastructure operation cost, labor cost, and environmental impact, but effectively improves the back-end classification and treatment efficiency and the output rate of renewable resources, resulting in the improvement of life cycle carbon emission reduction benefits. With the increasing participation rate and accuracy of domestic waste classification in the future, the cost in the collection stage will be greatly reduced, and the carbon reduction efficiency can be further improved.

Key words: municipal solid waste; waste classification; material flow analysis; life cycle assessment; life cycle cost; carbon reduction efficiency; Beijing